Conseil national de recherches Canada
National Research Council Canada

Division de l'énergie
Division of Energy

Programme d'énergie éolienne
Wind Energy Program

TM-WE-022

Available in English

Rapport Technique

Le programme canadien de recherche et développement en matière d'énergie éolienne : état de la situation et perspectives d'avenir

M.S. Chappell

Décembre 1984

D'après le discours d'orientation du "Septième symposium annuel canadien sur l'énergie éolienne" intitulé THE LEADING EDGE '84

Canada

CNRC No. 24687

86-02668/

Copyright 1985 par
Conseil national de recherches du Canada

De courtes citations et la reproduction de figures et tableaux du présent rapport sont autorisées sous réserve que la source en soit clairement mentionée.

Des exemplaires du rapport et d'autres publications de la Division de l'énergie peuvent être obtenus par courrier sur le paiement d'avance des droits requis (règlement par mandat de banque, mandat-exprès, mandat-poste ou chèque payables au Receveur général du Canada, crédit du CNRC) à l'adresse suivante:

Bureau de vente et diffusion des publications
Conseil national de recherches du Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0R6

Gratuit

Copyright 1985 by
National Research Council of Canada

Permission is granted to quote short excerpts and to reproduce figures and tables from this report, provided that the source of such material is fully acknowledged.

Copies of this and other publications of the Division of Energy may be obtained by mailing the appropriate remittance (a Bank, Express, or Post Office Money Order, or a cheque made payable to the Receiver General for Canada, credit NRC) to

Publication Sales and Distribution Office
National Research Council of Canada
Ottawa, Ontario
K1A 0R6

Free

Available in English, NRCC No. 24202

LE PROGRAMME CANADIEN DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN MATIÈRE D'ÉNERGIE ÉOLIENNE : ÉTAT DE LA SITUATION ET PERSPECTIVES D'AVENIR

par

M.S. Chappell
Gestionnaire

Programme de recherche et développement en matière d'énergie éolienne
Conseil national de recherches du Canada

d'après le discours d'orientation du
Septième symposium annuel canadien sur l'énergie éolienne
intitulé

"THE LEADING EDGE '84"

Décembre 1984

Harbour Castle Hotel, Toronto

TABLE DES MATIÈRES

Page

RÉSUMÉ v

SUMMARY vi

1.0 INTRODUCTION 1

2.0 LE GÉNIE ÉOLIEN 2
- 2.1 Caractérisation des ressources 2
- 2.2 Analyse de la performance aérodynamique des éoliennes . . . 3
- 2.3 Méthode de prédiction du rendement énergétique 4
- 2.4 Caractéristiques des structures 4
- 2.5 Évolution des systèmes éoliens 5

3.0 PERSPECTIVES D'AVENIR 9
- 3.1 La situation canadienne 9
- 3.2 État de la situation au CNRC 11
- 3.3 Orientation future 12

APPENDICE A : FIGURES 15

LISTE DES FIGURES

1 Vitesse du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol . . . 17
2 Variations dans le temps de la vitesse moyenne du vent 17
3 Répartition dans le temps de la vitesse du vent 18
4 Normales climatiques au Canada 19
5 Analyses des données sur l'énergie éolienne pour le Canada . . . 20
6 Station anémométrique d'évaluation d'un site d'implantation . . 21
7 Courbe de rendement type d'un système éolien 22
8 Puissance à l'arbre en fonction de la vitesse du vent - EAV des Îles-de-la-Madeleine (avec effets du décrochage aérodynamique) . 22
9 Calcul du potentiel énergétique par intégration de la courbe de rendement du système éolien et celle du régime des vents 23
10 Rendement énergétique d'un système éolien bien conçu (montrant l'influence du coefficient de puissance) 24
11 Profil exagéré de la déformation prévue par ordinateur du rotor d'une EAV 25
12 Fréquences naturelles d'une EAV de 230 kW (Îles-de-la-Madeleine) 25
13 Vue à vol d'oiseau du Centre d'essais éoliens de l'Atlantique (Île-du-Prince-Édouard) 26

FIGURES (Suite)

14 EAV autonome de 5 kW pour le chargement d'une batterie d'accumulateurs 27
15 EAV expérimentale de 230 kW couplée au réseau, Îles-de-la-Madeleine (Québec) 28
16 EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Christopher Point (Colombie-Britannique) 29
17 EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Swift Current (Saskatchewan) 30
18 EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Churchill (Manitoba) 31
19 EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Holyrood (Terre-Neuve) 32
20 Programme de recherche et développement du CNRC en matière d'énergie éolienne - EAV expérimentales de 50 kW 33
21 Prototype d'EAV de 500 kW, Centre d'essais éoliens de l'Atlantique 34
22 EAV expérimentale de 125 kW à support rigide tripode 35
23 Aéropompe d'irrigation DELTX, d'une capacité de 100 m^3 36
24 ÉOLE - Pièces constitutives d'une EAV de 4 MW 37
25 ÉOLE - Structure de supportage en voie de construction 38

RÉSUMÉ

Le présent rapport est basé sur le discours d'orientation du Septième symposium annuel canadien sur l'énergie éolienne, tenu les 10 et 11 décembre 1984, et qui s'intitulait "THE LEADING EDGE '84". Il fait un bref examen rétrospectif des programmes canadiens de recherche et développement en matière d'énergie éolienne et décrit l'état actuel de la technologie au chapitre de la caractérisation des ressources, de l'analyse des performances et de la conception des systèmes éoliens. Il retrace également l'évolution des principaux projets de recherche et d'expérimentation réalisés au Canada dans le domaine du génie éolien.

Compte tenu des progrès technologiques réalisés jusqu'à présent et de la situation actuelle de l'offre et de la demande en matière d'énergie, l'exposé identifie certains débouchés immédiats de l'industrie éolienne sur le marché canadien. Il décrit les priorités de la recherche à l'égard de la rentabilisation des moyens de production et souligne l'importance de promouvoir l'industrie canadienne et de participer aux travaux des organismes internationaux.

En novembre 1984, le gouvernement canadien a décidé d'abolir la Division de l'énergie du Conseil national de recherches (CNRC). Cette Division avait pour mission de diriger et de mettre en oeuvre le Programme fédéral de recherche et développement en matière d'énergie éolienne, dont les projets étaient en grande partie confiés au secteur privé, par voie de contrats. Le rapport décrit les conséquences d'une telle décision et propose certains moyens qui permettraient à l'industrie canadienne de l'énergie éolienne de poursuivre son essor.

SUMMARY

The report is based on the keynote address delivered to THE LEADING EDGE '84, Canada's Seventh Annual Wind Energy Symposium held in Toronto on 10/11 December 1984. It presents a brief retrospective overview of wind energy research and development in Canada. The current status of the technology is presented in respect to characterization of the resource, analytical performance predictions, and engineering development of wind energy conversion systems. The history and status of the major Canadian wind energy research activities and field trial projects are briefly outlined.

Based on the research achievements to date, and on the current energy supply/demand situation in Canada, appropriate near-term domestic applications of wind energy are identified. Research priorities to enhance the cost-effectiveness of these applications are described. The relevance of domestic deployment and Canadian participation in international wind energy forums is mentioned.

In November 1984, the Canadian government issued directives eliminating the Division of Energy of the National Research Counci (NRC). The Division had been responsible for directing and supporting the federal Wind Energy Research and Development (WERD) program, the majority of which was contracted to Canadian private industry. The ramifications of NRC's abandonment of the WERD program, and some alternatives for providing continued support to the evolving Canadian wind turbine industry, are presented.

LE PROGRAMME CANADIEN DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT EN MATIÈRE D'ÉNERGIE ÉOLIENNE : ÉTAT DE LA SITUATION ET PERSPECTIVES D'AVENIR

DISCOURS D'ORIENTATION : "THE LEADING EDGE '84"

M.S. Chappell

1.0 INTRODUCTION

Depuis 1974, la recherche et développement en matière d'énergie éolienne a été un volet essentiel de l'effort du gouvernement canadien visant à évaluer et mettre en valeur de nouvelles sources d'énergie et à favoriser la création d'une industrie canadienne dans ce domaine. C'est dans ce but qu'a été créé le Programme de recherche et développement en matière d'énergie éolienne, avec le soutien technique du Conseil national de recherches du Canada (CNRC). Afin d'accroître le potentiel du recherche ainsi que les transferts de technologie, les constructeurs canadiens d'éoliennes ont également été mis à contribution par voie de contrats de travaux. Ceux-ci ont permis, grâce à des programmes conjoints d'essais in situ, la participation des utilisateurs éventuels. Cette association a permis au secteur public (par le biais du CNRC) et au secteur privé de jeter les bases d'une orientation commune et d'une collaboration technique en matière d'énergie éolienne.

Le présent document donne un bref aperçu de l'évolution des programmes canadiens de recherche et développement en matière d'énergie éolienne, et fait état de la situation actuelle de la technologie au chapitre de la caractérisation des ressources, de la prédiction des performances et de la conception des systèmes éoliens. Il retrace également l'évolution des principaux programmes canadiens de recherche et d'expérimentation (essais in situ) dans le domaine.

Les progrès de la recherche et la situation actuelle de l'offre et de la demande en matière énergétique nous permettent d'identifier les applications de l'énergie éolienne les plus intéressantes à court terme au Canada, et d'orienter la recherche en vue d'assurer leur optimisation technique et économique.

À mesure que l'industrie progresse et que les systèmes deviennent plus perfectionnés et compétitifs, les possibilités d'exportation prennent de plus en plus d'importance. À cet égard, l'appui tangible du gouvernement aux constructeurs canadiens d'éoliennes se traduit par la participation active du CNRC aux travaux de l'Agence internationale de l'énergie et d'autres organismes internationaux de même nature.

Cependant, il ne fait aucun doute que l'abolition récente de la Division de l'énergie du CNRC entraînera un changement de direction radical des politiques gouvernementales à l'égard de la technologie éolienne.

2.0 LE GÉNIE ÉOLIEN

2.1 Caractérisation des ressources

Le vent est un sous-produit de l'énergie solaire : il résulte de la répartition inégale du rayonnement solaire à la surface du globe et du mouvement résultant des masses d'air vers les zones de moindre pression. Or, même à la hauteur des plus grandes éoliennes, le flux d'air intercepté demeure dans les couches de frottement de la basse atmosphère. Par conséquent, le régime local du vent est influencé par la topographie du lieu et sa vitesse augmente avec la hauteur au-dessus du sol (figure 1). En plus de varier dans l'espace, le vent varie aussi considérablement dans le temps (figure 2), depuis les variations saisonnières ou diurnes jusqu'aux bourrasques ne durant que quelques minutes ou aux tourbillons d'à peine une seconde. Rappelons à ce propos que le régime des vents est habituellement représenté au moyen d'un histogramme de la vitesse en fonction de la durée (figure 3). Toutes ces fluctuations doivent donc être prises en compte au moment des études conceptuelles. À cette fin, les données météorologiques recueillies sur de longues périodes pour la plupart des zones d'habitation contiennent des renseignements sur les vents. Ainsi, dans les Normales climatiques au Canada, ouvrage publié par le Service de l'environnement atmosphérique (SEA) du ministère de l'Environnement, notamment au volume 5 (figure 4), on trouve les relevés mensuels de la vitesse et de la direction du vent pour environ 400 localités différentes. Une série de rapports, préparés à partir de données tirées de cette publication et de diverses autres sources, sera bientôt disponible. On y trouvera notamment une compilation détaillée des données régionales concernant la densité de l'énergie éolienne, ainsi que d'autres renseignements particulièrement utiles aux utilisateurs de cette énergie (figure 5).

Ce type d'application est sans doute la meilleure façon d'utiliser les relevés météorologiques à long terme. Néanmoins, on a souvent besoin de données anémométriques détaillées sur des sites d'implantation potentiels éloignés des stations du SEA. Le problème peut être envisagé de deux façons. La première consiste à installer des instruments de mesure à l'emplacement considéré (figure 6) et à recueillir et analyser les données anémométriques pendant environ un an pour évaluer le potential énergétique du site. Le CNRC a fourni environ 30 anémographes à des utilisateurs potentiels d'énergie éolienne, pour faire des relevés de contrôle sur des sites d'implantation possibles choisis d'un commun accord. Des rapports mensuels ont été distribués à tous les participants et, parallèlement à ce

programme de "prospection" éolienne, le CNRC et le SAE ont entrepris l'étude d'une douzaine de types et modèles d'anémomètres et d'indicateurs différents. L'exactitude, la sensibilité, la robustesse et la fiabilité de ces appareils ont été évaluées dans les souffleries du SAE ainsi qu'au Centre d'essais éoliens de l'Atlantique.

La deuxième façon d'envisager le problème, sensiblement moins longue et coûteuse que la précédente, consiste à appliquer des techniques d'analyse qui permettent d'évaluer le régime des vents d'un site donné par interpolation, à partir des relevés effectués dans les sites avoisinants. Mais dans un pays aussi étendu et inégalement peuplé que le Canada, cette méthode ne donne pas des résultats parfaitement fiables et les experts du SEA, de concert avec les spécialistes en environnement atmosphérique d'autres pays, travaillent à l'élaboration de méthodes d'analyses de l'écoulement du vent sur le sol basées notamment sur des modèles mathématiques, des simulations en soufflerie et des mesures réelles sur le terrain. Le rapport d'une importante campagne internationale de mesures in situ, entreprise par le Canada avec la collaboration de six autres pays, sera publié au début de l'année prochaine par l'Agence internationale de l'énergie.

2.2 Analyse de la performance aérodynamique des éoliennes

Pour prévoir la performance d'un capteur et évaluer son rendement énergétique de même que les contraintes imposées à la structure, on établit, à l'aide des relations aérodynamiques classiques, les coefficients de portance et de traînée pour chaque segment de pale et on intègre les résultats pour l'ensemble du capteur. De plus, dans le cas des éoliennes à axe horizontal, ces calculs doivent être répétés pour diverses positions des pales, puisque celles-ci, en tournant, évoluent à des niveaux différents, et que la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur. Dans le cas des éoliennes à axe vertical, il faut tenir compte de l'influence de la pale amont sur la pale aval en considérant la réduction du moment d'écoulement par suite de l'effet extracteur de la pale amont. Bien que complexes, ces méthodes sont très élaborées et offrent un grand degré de précision. Les courbes de performance (figure 7) permettent au concepteur de prédire avec exactitude le rendement des capteurs - la marge d'erreur étant de l'ordre de 5% - pourvu que les données concernant les caractéristiques aérodynamiques des pales soient adéquates. À ce propos, il convient de noter que dans le cas des éoliennes, le profil des pales doit être étudié avec beaucoup plus de minutie que dans le cas des aéronefs. Ainsi, dans certains conditions, au cours d'une révolution complète, l'angle d'attaque d'une pale d'EAV peut passer successivement par toutes les valeurs, de 0° à 180°, alors que pour la plupart des aéronefs, un angle d'environ ±30° est suffisant. En outre, dans le cas des machines à couple limité par décrochage, comme l'éolienne Darrieus, la variation rapide de l'angle d'attaque

a une influence considérable sur la caractéristique de décrochage du profil de la pale (figure 8). Ces facteurs doivent tous être pris en compte pour éviter de sous-estimer la puissance fournie par le capteur et donc, de surcharger le mécanisme d'entraînement et le dispositif de conversion électrique.

2.3 Méthode de prédiction du rendement énergétique

La production énergétique annuelle d'un système éolien peut être calculée en intégrant sa courbe de rendement et celle de la vitesse-durée caractérisant le régime des vents au site considéré (figure 9). À partir de la courbe du régime des vents, on peut établir que la vitesse du vent est V durant un total de T heures par année. La courbe de rendement du système permet d'établir qu'à une vitesse du vent V, le système produit P kilowatts de puissance. Ainsi, le rendement énergétique annuel à une vitesse V est égal à $P \times T$ kWh. En effectuant le même calcul pour chaque vitesse observée entre les points de démarrage et d'arrêt, et en faisant la somme des valeurs d'énergie calculées, on obtient le rendement énergétique annuel total du système pour le site étudié, en admettant que la machine ait été libre de fonctionner en tout temps (aucune mise hors service). Il est maintenant possible d'effectuer ces calculs, ainsi que d'autres semblables, sur des micro-ordinateurs, et les programmes connexes sont abondamment documentés dans les publications techniques courantes.

Outre le rendement du capteur et l'efficacité du mécanisme d'entraînement, il faut veiller à ce que tous les éléments du système, y compris le dispositif de commande, soient conçus en fonction du type d'application prévu. Ainsi, la figure 10 montre que le rendement énergétique relatif d'un système éolien en fonction de la vitesse moyenne des vents est tributaire du coefficient de puissance. En effet, on constate que la production d'énergie peut varier de ±30% suivant que la puissance du générateur est bien ou mal adaptée à l'aire balayée par le capteur.

Le système de régulation d'un système éolien peut également avoir une influence considérable sur la production énergétique de l'installation. C'est ainsi que le délai requis pour confirmer un régime établi de vent dans la plage de fonctionnement a une incidence beaucoup plus grande sur la production énergétique à la vitesse d'arrêt qu'à celle de démarrage. En fait, la détermination de la vitesse limite d'arrêt est en soi un facteur déterminant pour ce qui est de la production énergétique.

2.4 Caractéristiques des structures

Les éoliennes Darrieus ont une structure en apparence assez simple. Leurs pales, de forme troposkienne, travaillent essentiellement en tension, mais des interactions élastiques avec les haubans, l'arbre central et le

mécanisme d'entraînement produisent de nombreux modes vibratoires complexes à diverses fréquences (figure 11). Des chercheurs au Canada, aux États-Unis, en Allemagne et en Suède ont mis au point des méthodes d'analyse très poussées du comportement dynamique de ces structures. Bien que leur application exige des ordinateurs de très grande puissance, ces méthodes permettent de prédire la configuration des divers modes vibratoires et leurs fréquences propres en fonction de la vitesse du rotor, de même que les effets de la force centrifuge sur la structure. À l'aide des familles de courbes (figure 12) obtenues par cette méthode, on peut déterminer si certains régimes permanents ou transitoires de fonctionnement recoupent des fréquences dangereuses. Des programmes semblables existent également pour l'analyse du comportement dynamique des structures d'éoliennes à axe horizontal.

Le choix des matériaux doit être fait en fonction des conditions d'exploitation souvent très rigoureuses auxquelles sont soumises les machines éoliennes. Au Canada, les sites éoliens sont souvent exposés à la poussière, l'air salin, la pluie, la neige, le verglas, ainsi qu'à des températures extrêmes et un ensoleillement intense. Dans ces conditions, l'aluminium et l'acier galvanisé ont donné des résultats satisfaisants sur les appareils prototypes; toutefois, il est possible que d'autres matériaux de base, comme le bois, la fibre de verre, etc. associés à certains types de revêtements, notamment la peinture époxydique et les revêtements d'oxydes présentent certains avantages du point de vue coût, résistance et fabrication.

2.5 Évolution des systèmes éoliens

Les sections précédentes ont traité des principaux outils de calcul mis à la disposition du concepteur d'éoliennes. Dans la présente section, nous étudierons brièvement certains prototypes réalisés grâce à ces techniques. Étant donné la nature diffuse de l'énergie du vent (environ 750 W/m^2 dans les sites raisonnablement propices), les éoliennes de grande puissance ont des dimensions relativement considérables. Or, non seulement cette contrainte a-t-elle une incidence sur la rentabilité des systèmes, mais elle suppose que les constructeurs d'éoliennes doivent effectuer leurs essais de prototypes à l'extérieur, de sorte que les problèmes et défaillances, inévitables lorsqu'il s'agit d'une technologie nouvelle, surviennent non pas dans l'intimité du laboratoire (comme c'est le cas par exemple pour le constructeur de turbines à gaz), mais bien au vue et au su de tout un chacun qui ne se gêne pas d'ailleurs pour prodiguer toutes sortes de conseils non sollicités chaque fois que quelque chose ne tourne par rond...

C'est en partie pour remédier à cette situation, mais principalement pour fournir aux constructeurs et utilisateurs de systèmes éoliens des installations d'essai permanentes bien équipées qu'a été établi en 1981 le

Centre d'essais éoliens de l'Atlantique (CEEA) à North Cape, dans l'Île-du-Prince-Édouard (figure 13). Malgré sa création relativement récente, le CEEA a mis à l'essai environ une douzaine d'éoliennes, a suscité l'élaboration de normes canadiennes d'essais en matière d'énergie éolienne et noué des liens étroits avec d'autres centres d'essais éoliens tant aux États-Unis qu'en Europe.

En 1979, une série de petites éoliennes expérimentales à axe vertical d'une puissance de 1 à 5 kW ont été conçues et réalisées par la Bristol Aerospace, avec l'appui du CNRC (figure 14). Chaque appareil comportait un alternateur à aimant permanent à entraînement direct couplé à un redresseur, pour charger des batteries d'accumulateurs servant à alimenter des stations de télécommunications. Les six éoliennes mises en place ont fonctionné de manière sporadique pendant plusieurs années.

Le premier prototype d'aérogénérateur de moyenne puissance construit au Canada fut l'éolienne à axe vertical de 230 kW conçue et réalisée par la société DAF Indal et mise en place aux Îles-de-la-Madeleine (figure 15). Le système d'instrumentation très élaboré qui accompagnait l'installation a fourni la majeure partie des données utilisées pour le contrôle des méthodes d'analyse aérodynamique et structurelle mentionnées précédemment. Ayant rempli son rôle de station expérimentale, l'éolienne des Îles-de-la-Madeleine (surnommée "le Géant des Îles") a maintenant été couplée au réseau électrique diesel desservant la région.

Afin d'obtenir des données concernant le fonctionnement des éoliennes dans des conditions d'exploitation réelles, et permettre aux utilisateurs éventuels d'acquérir une expérience pratique de la technologie, une série d'aérogénérateurs d'une puissance de 50 kW couplés au réseau électrique ont été installés à travers le Canada entre 1978 et 1982, en collaboration avec divers services d'utilité publique. Quatre d'entre eux sont toujours en exploitation à Christopher Point, en Colombie-Britannique (figure 16), Swift Current, en Saskatchewan (figure 17), Churchill, au Manitoba (figure 18) et Holyrood à Terre-Neuve (figure 19). Sur le site de Holyrood, un système plus ancien, qui était déjà en place, a été démonté après une période de fonctionnement d'environ 4500 heures et minutieusement inspecté par les laboratoires du CNRC qui ont trouvé la structure en parfait état. Ensemble, ces cinq systèmes ont cumulé 38 000 heures de fonctionnement (31 000 heures de production) et fourni un total de plus de 370 MW/h aux réseaux auxquels ils étaient couplés (figure 20). Jusqu'à présent, chacun d'entre eux a fonctionné durant près de 10 000 heures, avec un taux disponibilité de plus de 90% en moyenne. Un autre système du même genre a été couplé à un réseau hybride autonome (éolien-diesel) de 50/100 kW afin d'en étudier le fonctionnement dans des conditions d'implantation isolée.

Forts de l'expérience acquise lors des essais effectués sur les éoliennes de 50 kW mentionnées ci-dessus, les concepteurs de la DAF Indal Ltée ont mis au point une EAV de 500 kW (figure 21) dont l'originalité ne réside pas dans le rotor, qui est très semblable à celui de l'éolienne des Îles-de-la-Madeleine, mais dans le concept innovateur du mécanisme d'entraînement. Le rotor se compose de deux pales en alliage d'aluminium extrudé de profil NACA 0015 ayant 0,74 m à la corde. Son diamètre et sa hauteur sont respectivement de 24,4 m et 36,6 m; l'aire balayée est de 595 m^2 et la capacité de charge de 877 W/m^2. Quant à l'organe de conversion, il se compose de deux alternateurs jumelés d'une puissance de 261 kW, entraînés chacun par un pignon engrené sur une couronne centrale de 2,5 m de diamètre. Le premier système de ce genre a été employé par la Southern California Edison Company, près de Palm Springs, en Californie. Un deuxième, très instrumenté, a été mis en place au Centre d'essais éoliens de l'Atlantique en novembre 1983. Il fonctionne depuis le 17 janvier 1984, et les travaux de mise en service et d'étalonnage du système d'instrumentation ont été complétés à la fin du mois de mars. Mais durant la première année, cette installation n'a fonctionné que pendant 600 heures, par suite d'ennuis mécaniques avec divers organes de transmission, de fuites d'huile dans le système hydraulique et de défaillances du système de commande. On espère que ces problèmes sont maintenant résolus et que les essais de résistance mécanique et de performance pourront se poursuivre sans autre interruption.

Le CNRC a également attribué un contrat à la société Adecon Energy Systems Inc. pour la mise au point d'une EAV de 125 kW. Dans le prototype proposé, le sommet du rotor est supporté non pas par un système de haubans mais par une structure tripode à poutres treillis (figure 22). Les dimensions du rotor sont de 17 m de diamètre et 25,5 m de hauteur, l'aire balayée étant de 283 m^2 et la capacité de charge de 442 W/m^2. Les deux pales, constituées d'un ensemble de profilés en aluminium extrudé à parois minces, ont un profil uniforme NACA 0018 ayant 0,6 m à la corde. Le mécanisme d'engrenage et l'alternateur sont supportés par les membrures inférieures de la structure, en sorte que le plan équatorial du rotor se situé à 25,5 m au-dessus du sol. Les principaux avantages de ce système: son coût relativement modeste, sa facilité de transport et d'installation et sa bonne performance en régime de vents moyens. Le prototype de la société AES a été mis en place en décembre 1984 sur le site du Centre d'essais éoliens de l'Atlantique, pour être soumis à des essais poussés de performance et de résistance.

Un autre prototype a été mis au point par la société Deltx Windpump Ltd. de Calgary. Il s'agit d'une éolienne géante du type "moulin à vent", destinée au pompage de l'eau, s'inspirant du système Kentfield à pales delta (figure 23). Cette aéropompe à axe horizontal comprend un rotor à huit pales mesurant 16 m de diamètre couplé à une pompe volumétrique

alternative à deux cylindres, caractérisée par une faible hauteur d'élévation et un grand débit. Elle est destinée à l'irrigation et au stockage de réserves hydro-électriques. Le débit prévu est d'environ 100 m^3/min à une hauteur de 10 m, avec un vent de 16 m/s à la hauteur du moyen, c'est-à-dire 31,4 m. La phase des essais de rendement quantitatif est présentement en cours, après une période de rodage de 300 heures.

Il faut également mentionner le projet ÉOLE, auquel participent conjointement le CNRC et Hydro-Québec, et qui a pour objet la conception, la réalisation et l'évaluation d'une EAV Darrieus de 4 MW (figure 24). Le rotor bipale de 96 m × 64 m sera construit en acier et entraînera un alternateur à accouplement direct ayant un régime de l'ordre de 14 tr/min, avec convertisseurs CA-CC-CA servant à adapter la fréquence, l'angle de phase et la tension aux caractéristiques du réseau. Le site d'implantation choisi se trouve près de Cap Chat, au Québec. Les travaux de construction sont déjà en bonne voie d'exécution (figure 25), et le gros oeuvre en béton devrait être terminé d'ici la fin de décembre. La phase d'assemblage et d'installation du rotor prendra environ un an et le lancement est prévu pour le début de l'année 86. Les principaux éléments du système sont fabriqués notamment par Versatile Vickers Inc., la compagnie Générale Électrique et Hayes-Dana Corporation.

C'est d'ailleurs grâce à l'expérience et aux connaissances acquises par le personnel du CNRC, ainsi qu'aux importantes études techniques effectuées pour le compte de celui-ci par les constructeurs de systèmes éoliens et divers bureaux d'études qu'il est possible d'envisager la réalisation de tels prototypes. Ces études, qui exploraient l'incidence de la variation des paramètres de conception sur la valeur technique et économique des systèmes, ont toutes fait l'objet de publications techniques. Celles-ci sont diffusées par divers centres de documentation technique, notamment l'Institut canadien de l'information scientific et technique (ICIST).

En plus des projets parrainés par le CNRC, il faut mentionner les travaux effectués indépendamment par certaines entreprises canadiennes intéressées à la conception et la fabrication d'éoliennes à axe vertical ou horizontal, notamment la Wellington Windpower, la Thermax et l'Extrawatt. Par ailleurs, d'autre entreprises également qualifiées se spécialisent dans l'application et l'entretien de diverses marques étrangères de systèmes éoliens. Citons enfin la société Howdens d'Écosse qui a produit des éoliennes de 300 kW et 60 kW pour les Îles Orkney, et qui envisage de s'implanter à Scarborough. Ainsi, à l'heure actuelle, l'industrie canadienne de l'énergie éolienne est constituée d'environ une douzaine de constructeurs expérimentés et d'une trentaine de bureaux d'études.

3.0 PERSPECTIVES D'AVENIR

3.1 La situation canadienne

En 1973, les Canadiens ont subitement été forcés de se rendre compte que les ressources pétrolières n'étaient pas inépuisables et que leur approvisionnement était même à la merci des moindres caprices du climat politique international. Toutefois, au cours des dix années qui ont suivi ce qu'il est convenu d'appeler "la crise du pétrole", les craintes de pénurie imminente se sont apaisées et les programmes d'économie de l'énergie, qui constituent à long terme notre meilleure ressource énergétique, ont sensiblement contribué à ménager nos réserves. En outre, la recherche, le développement et l'initiative industrielle ont permis de découvrir des applications appropriées aux énergies renouvelables, biomassique, solaire et éolienne. Certes, aucune de ces sources d'énergie ne s'est révélée comme étant la solution miracle et toutes présentent un défi technique et économique plus grand que prévu. Quoiqu'il en soit, nos besoins à long terme en matière d'énergies nouvelles, particulièrement à l'échelle globale, sont toujours aussi pressants, d'autant plus que, selon les statistiques publiées par la Conférence mondiale de l'énergie, d'ici l'an 2020, la population du globe aura doublé et les besoins énergétiques auront triplé.

Aujourd'hui, la stratégie de développement de la technologie éolienne canadienne n'a pas la même perspective qu'il y a dix ans. La construction de centrales électriques classiques prévues aux termes d'engagements antérieurs, en fonction de données prévisionnelles vieilles de dix ans, a produit un effet de "surcapacité" dans la plupart des réseaux électriques du pays, effet qui persistera probablement tout au long des dix prochaines années, jusqu'à ce que la demande atteigne la capacité de charge disponible. Aussi est-il peu probable que nous voyions l'implantation massive d'aérogénérateurs d'une puissance de l'ordre du mégawatt d'ici 1995, à moins que les besoins d'exportation dépassent la capacité de production des réseaux actuels. Ce sursis permettra aux chercheurs et constructeurs d'optimiser le potentiel technique et économique d'une technologie encore en développement.

À l'heure actuelle, le marché canadien de l'énergie éolienne se situe dans les régions éloignées, où l'on exploite plus de 800 génératrices diesel totalisant une puissance supérieure à 160 MW. Or, les coûts de combustible entraînés par ce type de système se situent entre 8¢ et 75¢ le kWh et dépassent même dans certains cas 1$ le kWh, alors qu'un grand nombre de ces régions sont caractérisées par des régimes de vents allant de modérés à favorables.

Or, le projet expérimental de Sudbury a confirmé la faisabilité technique des groupes électrogènes mixtes éolienne/diesel, et a démontré qu'en

régime de vents modérés, un système bien conçu permet des économies de combustible de 30 à 40 %. Cependant, le couplage d'une éolienne à un système diesel existant nécessite des études de conception très poussées et un système de régulation parfaitement au point. La société GasTOPS Ltée est d'ailleurs entrain d'élaborer un modèle dynamique très complet sur l'ordinateur hybride (numérique/analogique) du CNRC. Ce modèle pourra simuler le comportement dynamique de n'importe quel système mixte éolienne/diesel à partir d'une banque de données concernant divers organes comme l'éolienne, le moteur diesel, l'alternateur, le système de stockage, etc. Ce programme pourrait même eventuellement permettre le raccordement d'appareillages de commande réels, à des fins de mise au point ou de vérification. Les chercheurs du CNRC et de diverses entreprises industrielles travaillent également à la création de programmes moins complexes capables d'établir la performance globale des systèmes et de fournir des données économiques pertinentes.

La crédibilité technique et économique des systèmes éoliens canadiens dans les régions éloignées dépendra des efforts investis par les concepteurs pour adapter les installations aux exigences du milieu. Car la fiabilité du matériel et l'efficacité du programme d'entretien sont d'une importance capitale. Ainsi, un délai d'un mois pour le remplacement d'une résistance électrique ne valant que quelques cents pourrait se traduire par une perte de 20 % de la production énergétique annuelle, sans compter le discrédit qu'un tel contretemps risque de jeter sur le système. Les applications en régions éloignées supposent en outre une analyse approfondie des questions de logistique comme le transport et les méthodes de mise en place de la structure. Car bien souvent, les communautés isolées ne disposent pas de grues suffisamment puissantes, ou leur relief accidenté se prête mal à l'utilisation de matériel lourd. D'autre part, il faut rappeler que les variations de charge sont relativement prononcées dans le case des petits réseaux: un système qui ne tient pas compte de ce facteur risque d'avoir un rendement médiocre et même, un fonctionnement instable, avec tous les ennuis que cela suppose tant au niveau de l'éolienne que du groupe diesel.

C'est grâce à un programme d'essais rigoureux qu'on pourra établir si les SCEE peuvent fonctionner adéquatement dans les régions éloignées du Canada, où les conditions climatiques sont particulièrement sévères. Or le CEEA dispose justement du personnel et du matériel techniques nécessaires pour effectuer ce genre de travail. Il est à espérer qu'on pourra consacrer les sommes et le temps nécessaires à ces évaluations essentielles, dans le cadre de projets expérimentaux à court terme.

Mais il ne faudrait pas croire que dans l'immédiat, les seuls débouchés possibles pour les aérogénérateurs canadiens sont les systèmes à éolienne individuelle conçus pour les sites isolés. Il existe en effet deux ou trois sites particulièrement propices à l'implantation d'un réseau

d'éoliennes de moyenne puissance. Citons le cas des Îles-de-la-Madeleine, actuellement desservies par un réseau de génératrices diesel d'une puissance combinée de 50 MW, et où le régime moyen annuel des vents est de près de 10 m/s, ce qui en fait un site éolien idéal. Il y a également d'autres sites prometteurs aux Îles Reine-Charlotte, en Colombie-Britannique, et dans l'Île-du-Prince-Édouard.

L'intérêt économique des aérogénérateurs pour les petits réseaux alimentés au diesel varie en fonction du rendement énergétique et des coûts de mise en place et d'entretien de l'installation. Des études antérieures ont démontré que les frais de transport, de mise en place et de branchement, ainsi que les services auxiliaires (aménagement des voies d'accès, pose d'une clôture surveillance du réseau, etc.) représentent une part considérable du coût de l'installation, sans compter évidemment les dépenses d'immobilisation associées à l'aérogénérateur lui-même. Les coûts d'entretien à long terme sont encore mal définis, et comme les prévisions sont souvent faites en fonction de "la loi du pire", les possibilités de revenu en sont considérablement réduites. Pour les premiers prototypes, on pourrait envisager un programme de subventions afin d'aider les constructeurs à absorber le coût élevé d'appareils produits en aussi petite quantité. Signalons cependant que ce genre de programme tend à supporter des technologies qui ne sont pas suffisamment "mûries" ou incite à négliger l'optimisation du taux de rentabilité. Aussi devrait-on sérieusement envisager la possibilité de subventionner plutôt la performance réelle (par exemple en fonction du rendement énergétique), ou d'accorder des subventions dégressives, avec réductions échelonnées par exemple sur une période de cinq ans. Les malheurs qui ont marqué les débuts de l'industrie éolienne en Californie peuvent être attribués à l'enthousiasme prématuré des investisseurs. L'excès contraire pourrait avoir une effet tout aussi néfaste.

3.2 État de la situation au CNRC

Les récents travaux au Canada dans le domaine de la recherche et développement en matière d'énergie éolienne ont été initiés en 1966 par MM. Raj Rangi et Peter South, du Laboratoire d'aérodynamique des bases vitesses (CNRC). Ces deux ingénieurs cherchaient un moyen simple de produire l'énergie nécessaire au pompage de l'eau et à l'alimentation électrique de petites localités dans les pays en voie de développement. En 1975, les travaux de MM. South et Rangi ont pris une nouvelle dimension et ont été réorientés dans les sens de l'intérêt canadien à l'égard des énergies nouvelles à titre d'appoint aux sources d'énergie locales.

Dans la décennie qui a suivi (1974-1984), les activités du Programme canadien de recherche et développement en matière d'énergie éolienne ont été axées sur l'attribution de contrats à une industrie canadienne

naissante dans la construction d'éoliennes. Au cours de l'exercice de 1974/1975, le gouvernement fédéral consacrait 60 000 $ à la recherche et développement en matière d'énergie éolienne, la majeure partie de cette somme étant attribuée au CNRC. Au cours de l'exercice de 1984/1985, le même budget a atteint la somme de 8,3 millions de dollars, dont 90 % ont servi à financer des contrats de recherche attribués à l'entreprise privée ou à des organismes provinciaux, notamment une somme de 5 millions pour le projet ÉOLE. Toutes les activités financées en vertu de ce budget étaient coordonnées par le Comité interministériel sur la recherche et le développement énergétiques (CIRDE).

En novembre 1984, le gouvernement canadien a décidé, dans le cadre d'un vaste programme de restrictions budgétaires, de mettre fin à la participation du CNRC aux travaux du CIRDE. Par conséquent, le budget et le personnel du CNRC affectés à l'énergie éolienne ont été pratiquement éliminés, et le peu de ressources qui reste suffit à peine à respecter les engagements contractuels en cours. Durant cette période de "liquidation", le personnel du CNRC se consacrera principalement à l'interprétation, la synthèse et la documentation des progrès technologiques que nous avons réalisés jusqu'à présent. Nous sommes convaincus que cette technologie trouvera son emploi, aussi bien au Canada que dans le cadre de nos obligations en matière d'aide aux nations moins favorisées.

Au cours des dix dernières années, le Canada est devenu un partenaire respecté dans toutes les spécialités du génie éolien, notamment l'étude des courants atmosphériques, l'évaluation des sites d'implantation, l'étude des caractéristiques aérodynamiques et du comportement des structures, l'élaboration des normes, les études de conception et les techniques de fabrication de systèmes éoliens fiables et efficaces.

Le CNRC a été la figure de proue de la participation canadienne aux accords de l'Agence internationale de l'énergie concernant la recherche en matière d'énergie éolienne. Il est actuellement à la tête du Comité exécutif de l'Accord de l'AIE concernant les grands aérogénérateurs. En outre, le Canada est reconnu comme l'autorité mondiale dans le domaine des éoliennes à axe vertical et a fourni les informations techniques, les analyses et les conseils sur lesquels les Américains, les Allemands et les Britanniques ont fondé leurs programmes de recherche et développement concernant les EAV. Ces efforts ne demeureront pas stériles et le CNRC est fier du rôle qu'il a joué dans l'évolution de cette technologie.

3.3 Orientation future

Même si le CNRC n'est plus en mesure de continuer à attribuer des contrats de recherche et développement dans le domaine de l'énergie éolienne et qu'il doit revenir à une activité interne relativement modeste

de recherche fondamentale au sein du Laboratoire d'aérodynamique des bases vitesses, il subsiste d'autres ressources grâce auxquelles le génie éolien pourra continuer de progresser. Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs aérogénérateurs canadiens ont atteint un stade de perfectionnement suffisant pour devenir opérationnels et les services d'Énergie, Mines et Ressources Canada (EMR) disposent des moyens nécessaires pour appuyer et superviser de tels projets. La fabrication d'éoliennes est une industrie prometteuse pour le Canada. Or, le ministère de l'Expansion industrielle régionale a créé des programmes visant à appuyer les initiatives industrielles et le Bureau du développement industriel du CNRC est théoriquement en mesure d'offrir son appui grâce à ses programmes de projets "Industrie-Laboratoire" et d'aide à la recherche industrielle. Enfine, il ne faut pas oublier l'Association canadienne de l'énergie éolienne, créée lors du symposium de décembre 1984. C'est aujourd'hui que l'existence de cet organisme prend tout son sens et qu'il pourra devenir le point de convergence des préoccupations techniques et organisationnelles de l'industrie éolienne.

APPENDICE A : FIGURES

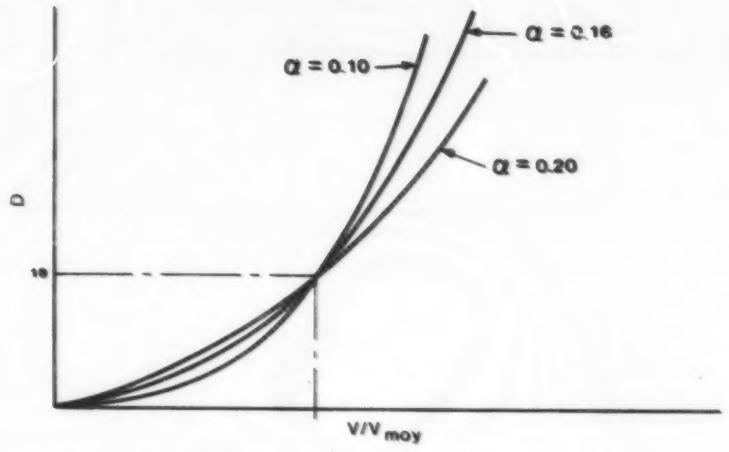


Fig. 1. Vitesse du vent en fonction de la hauteur

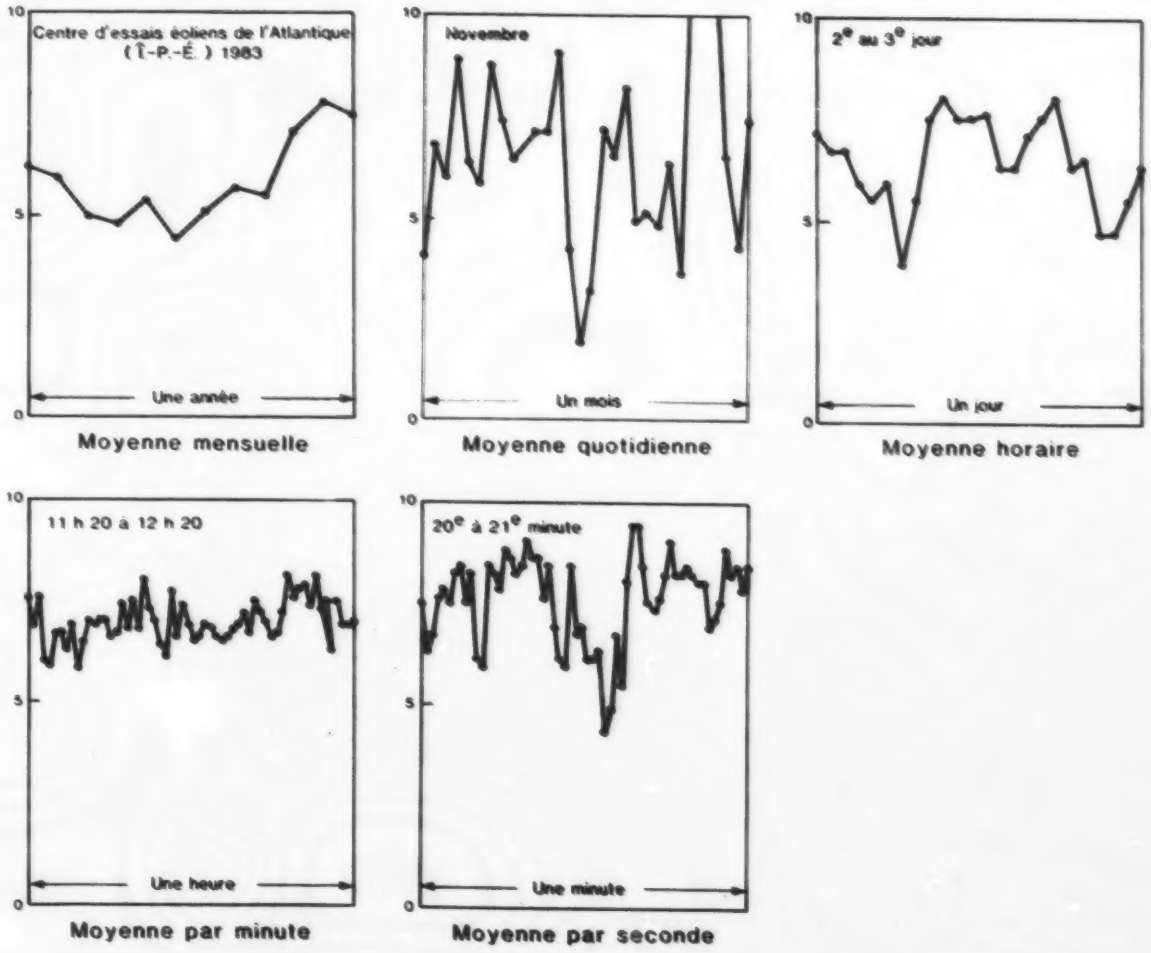


Fig. 2. Variations dans le temps de la vitesse moyenne du vent

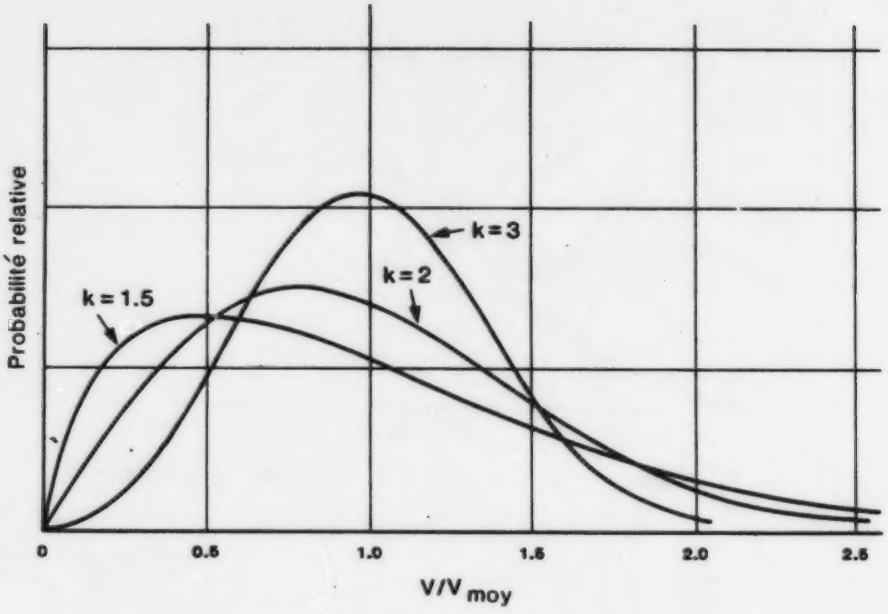
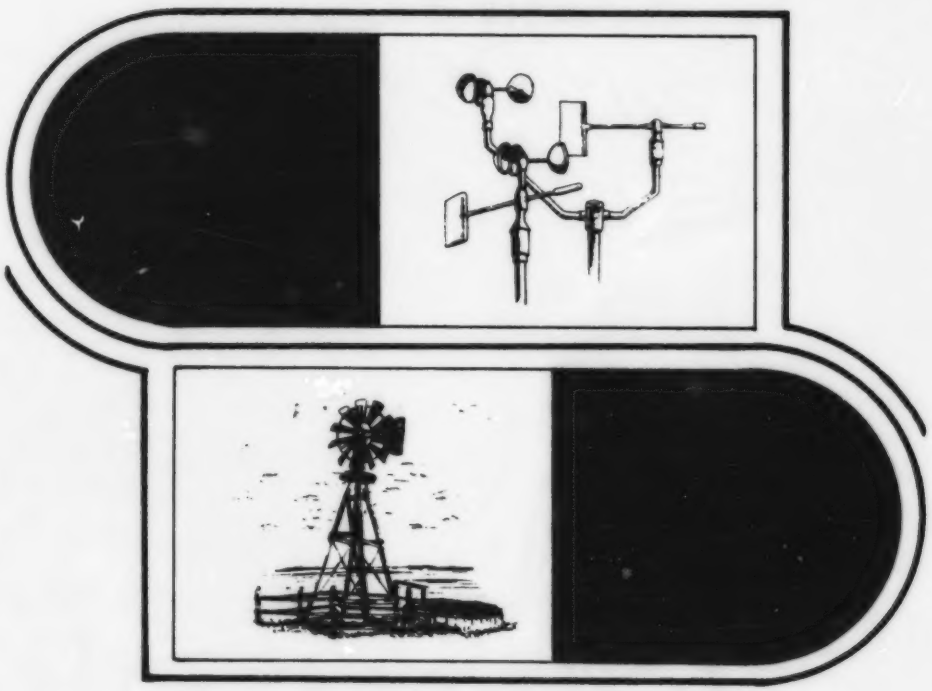


Fig. 3. Répartition dans le temps de la vitesse du vent

Environment Canada / Environnement Canada
Atmospheric Environment Service / Service de l'environnement atmosphérique

CANADIAN CLIMATE NORMALS
NORMALES CLIMATIQUES AU CANADA

VOLUME 5



1951-1980

Canada

Fig. 4. Normales climatiques au Canada. Figure tirée du vol. 5 des Normales climatiques au Canada, (Vent 1951-1980), publication du Service de l'environnement atmosphérique (Programme climatique canadien), Environnement Canada, 1982.

Environment Canada / Environnement Canada
Atmospheric Environment Service / Service de l'environnement atmosphérique

WIND ENERGY DATA ANALYSES FOR CANADA 1967-1976

Volume 3: Ontario

ANALYSE DES DONNÉES SUR L'ÉNERGIE ÉOLIENNE POUR LE CANADA 1967-1976

Volume 3: Ontario

Canada

Fig. 5. Analyse des données sur l'énergie éolienne pour le Canada. Tiré de la publication intitulée Analyse des données sur l'énergie éolienne pour le Canada 1967-1976, Volume 3 ; Ontario, diffusée par le Programme climatique canadien, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 1985.

Fig. 6. Station anémométrique d'évaluation d'un site d'implantation

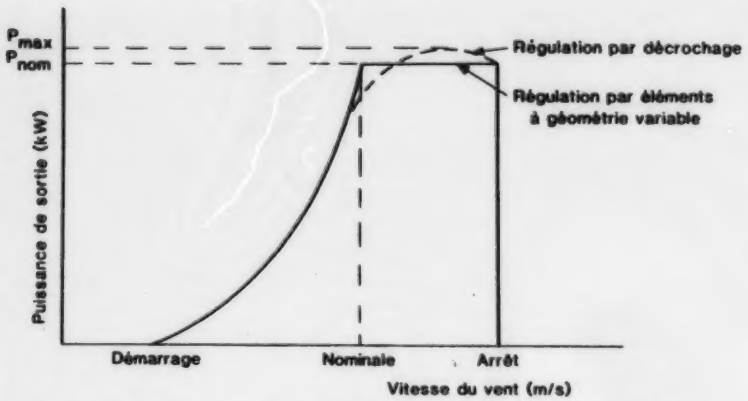


Fig. 7. Courbe de rendement type d'un système éolien

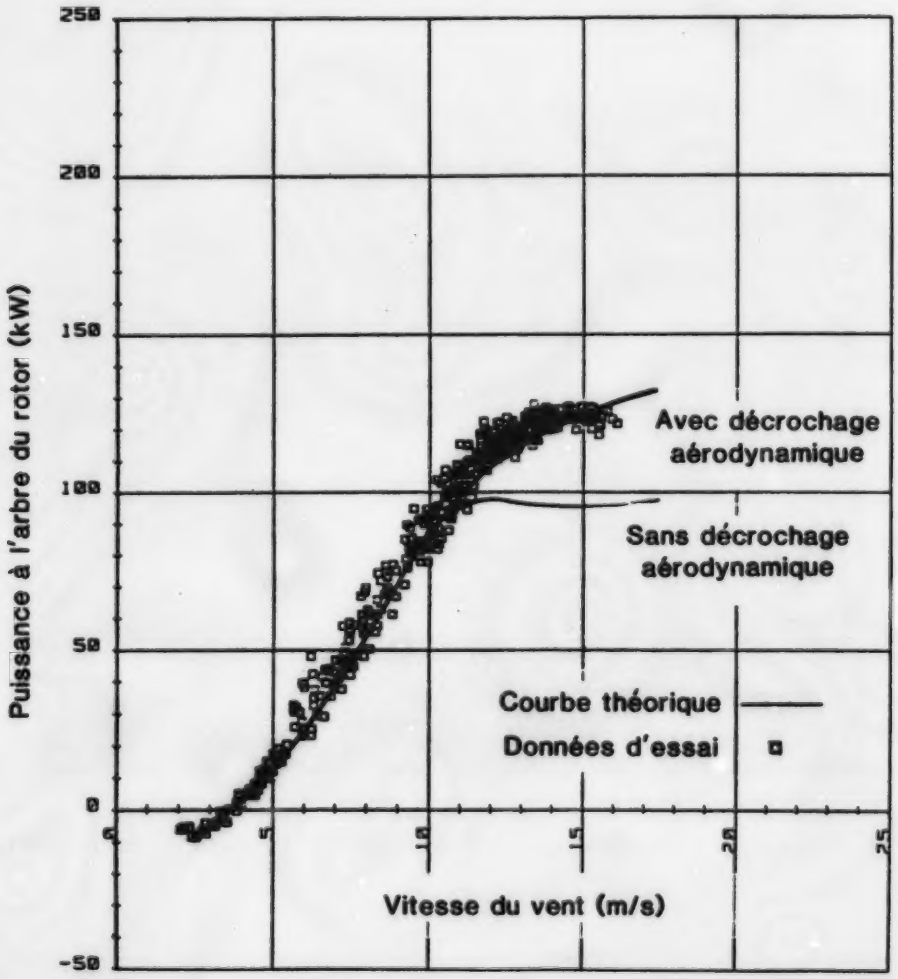


Fig. 8. Puissance à l'arbre en fonction de la vitesse du vent - EAV des Îles-de-la Madeleine (avec effets du décrochage aérodynamique)

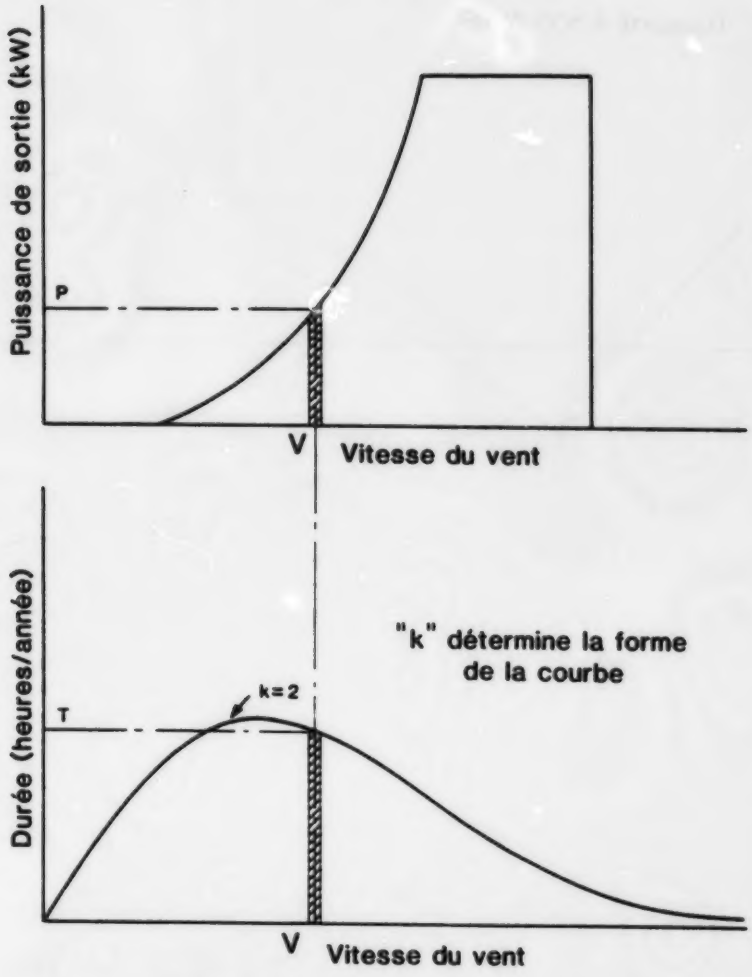


Fig. 9. Calcul du potentiel énergétique par intégration de la courbe de rendement du système éolien et celle du régime des vents

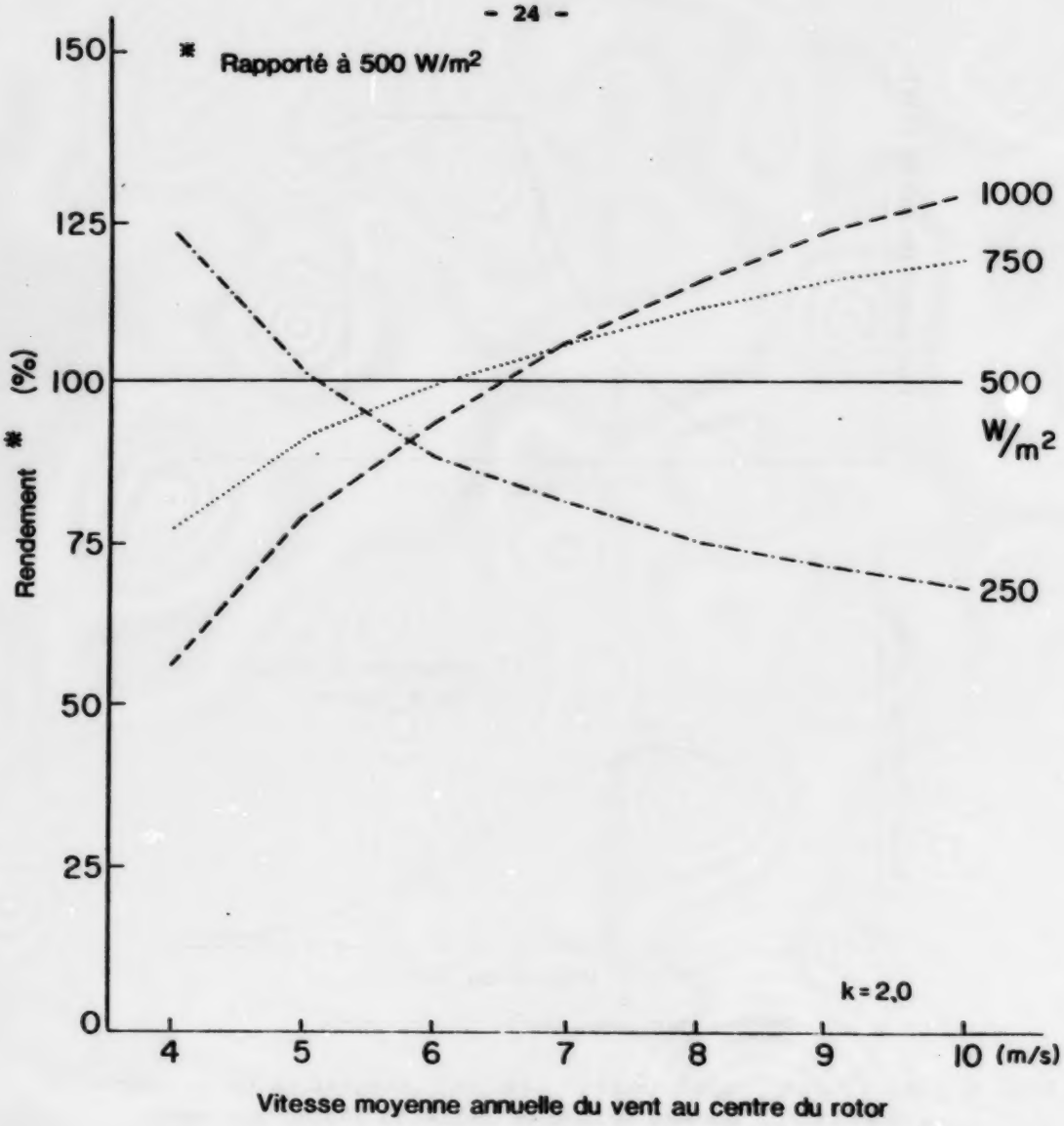


Fig. 10. Rendement énergétique d'un système éolien bien conçu (montrant l'influence du coefficient de puissance)

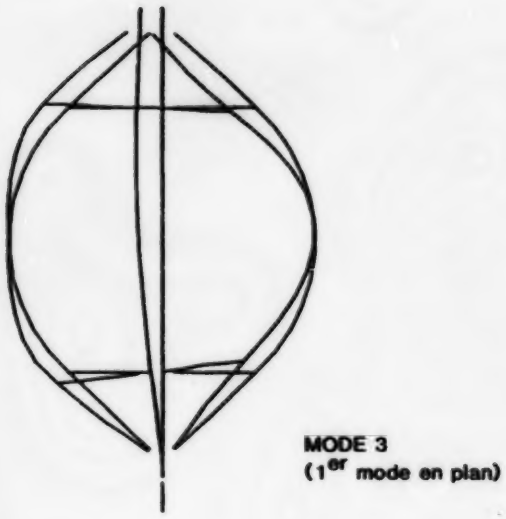


Fig. 11. Profil exagéré de la déformation prévue par ordinateur du rotor d'une EAV

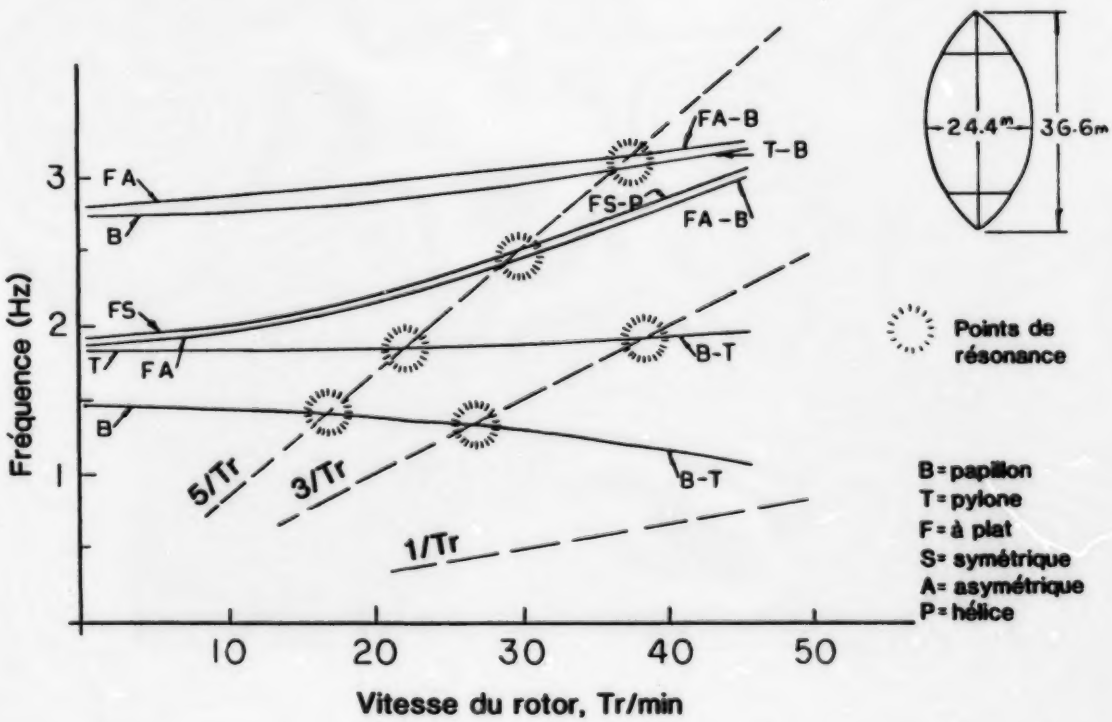


Fig. 12. Fréquences naturelles, EAV de 230 kW (Îles-de-la-Madeleine, Canada). D'après la figure 3.2 du document intitulé "Technology Development Study of Vertical Axis Aerogenerator Systems Yielding the Lowest Cost of Energy, Report : Task #4, Structural Analysis and Computer Program Development" préparé par DAF Indal Ltée, mai 1982.

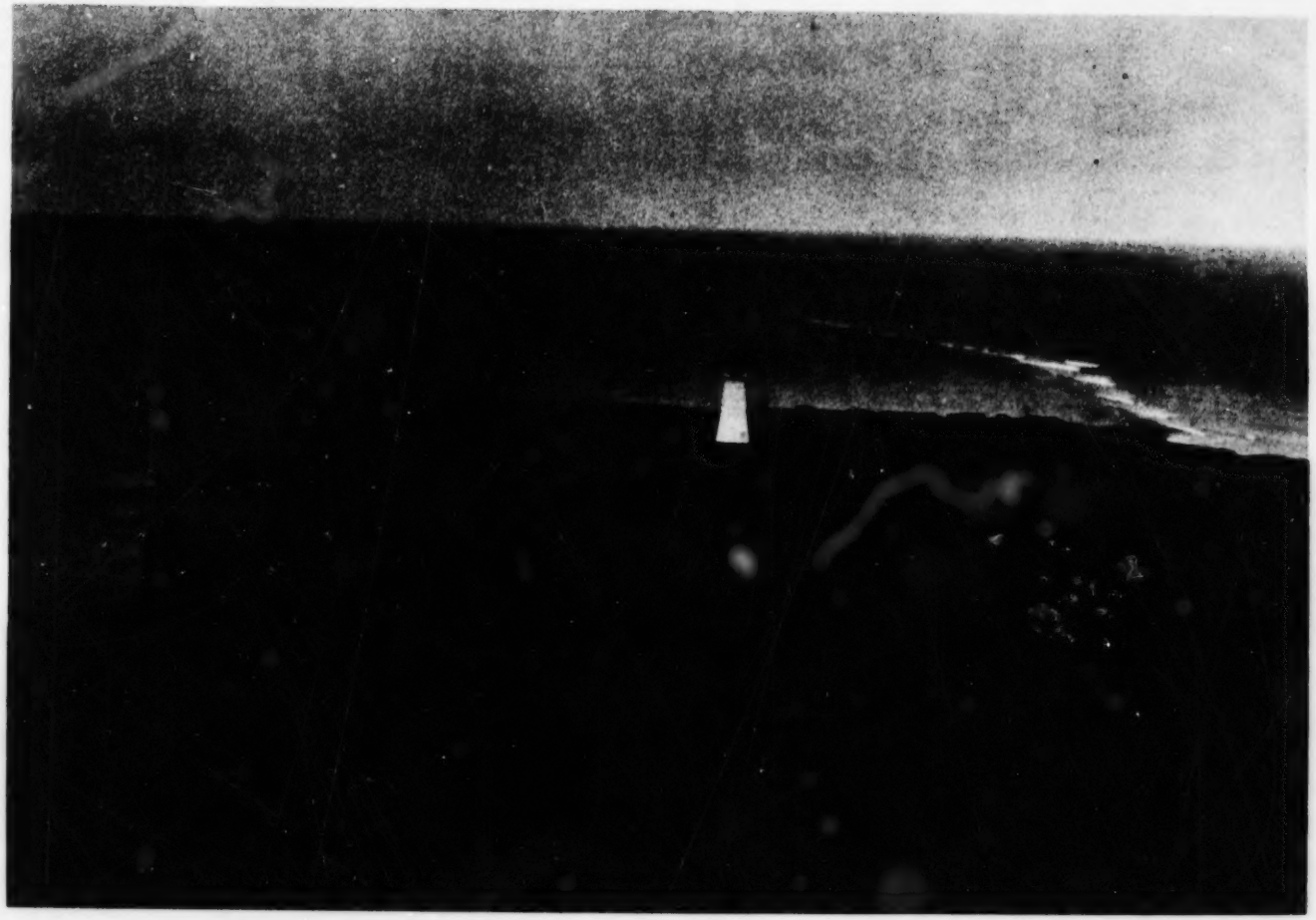


Fig. 13. Vue à vol d'oiseau du Centre d'essais éoliens de l'Atlantique (Île-du-Prince-Édouard)

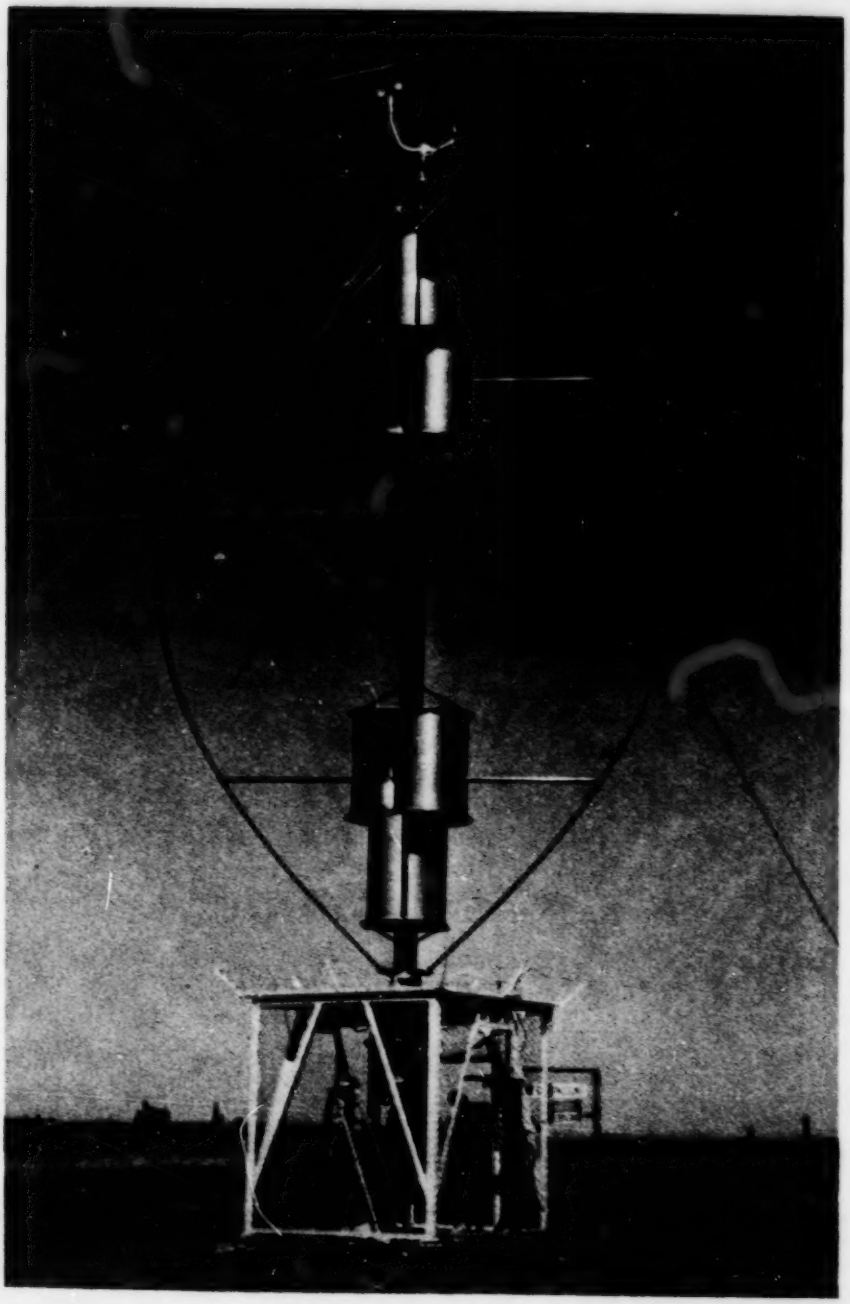


Fig. 14. EAV autonome de 5 kW pour le chargement d'une batterie d'accumulateurs

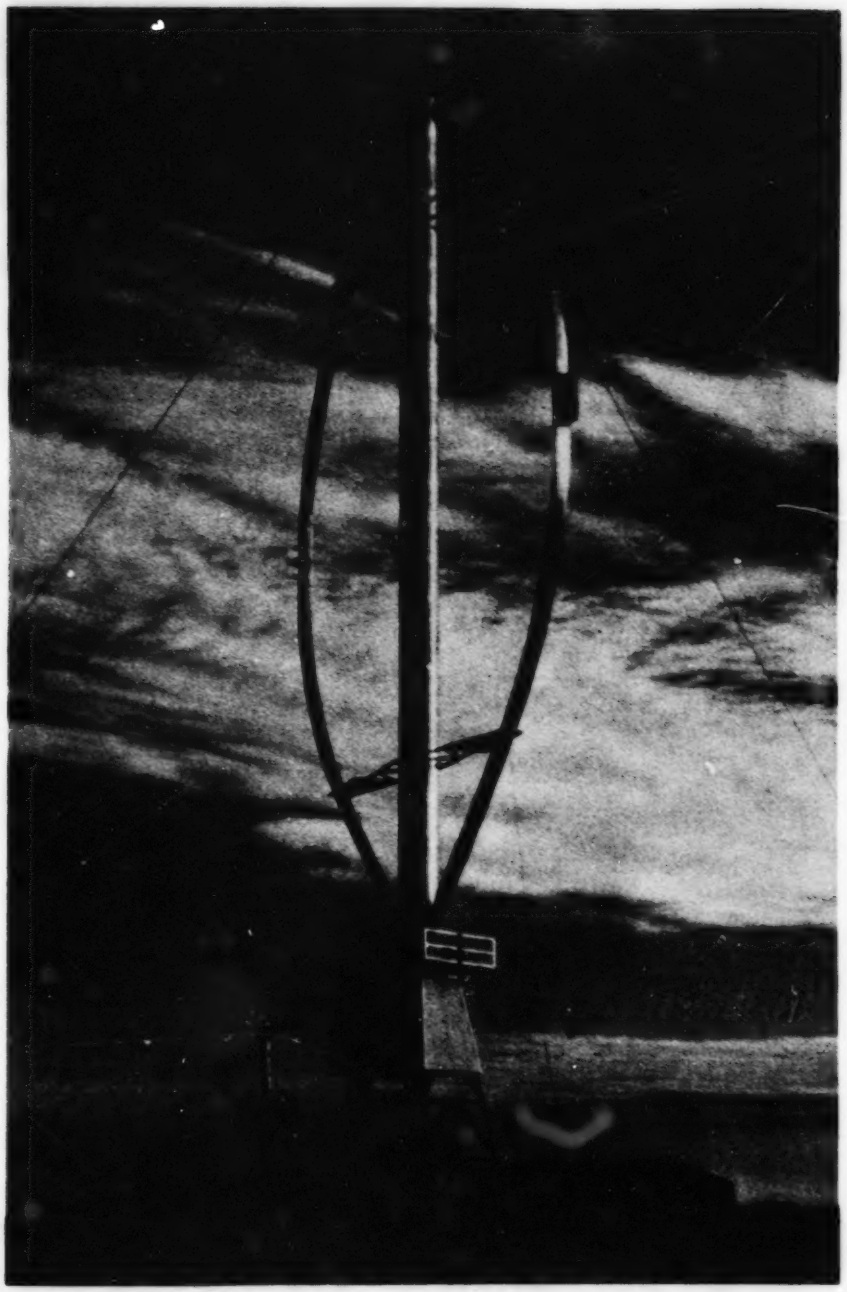


Fig. 15. EAV expérimentale de 230 kW couplée au réseau, Îles-de-la-Madeleine (Québec)

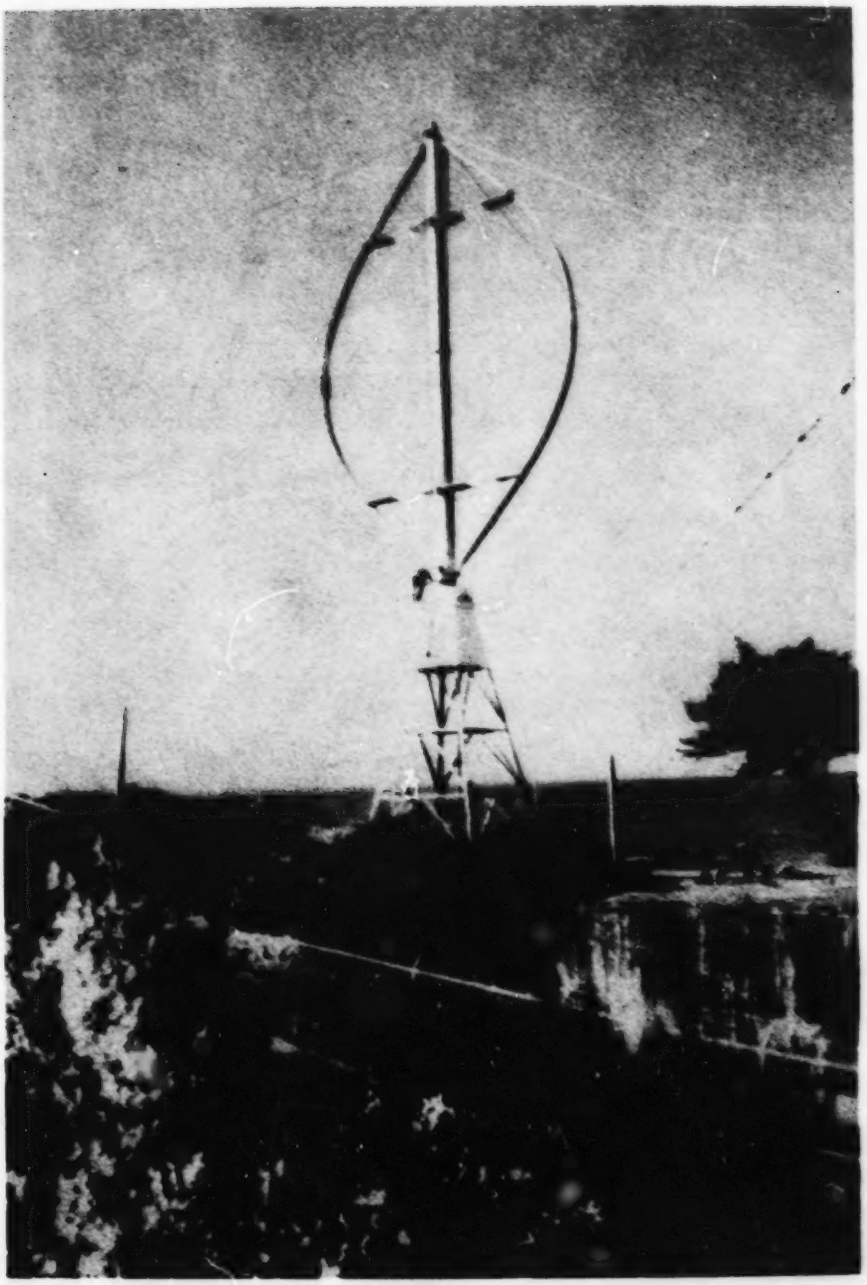


Fig. 16. EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Christopher Point (Colombie-Britannique)

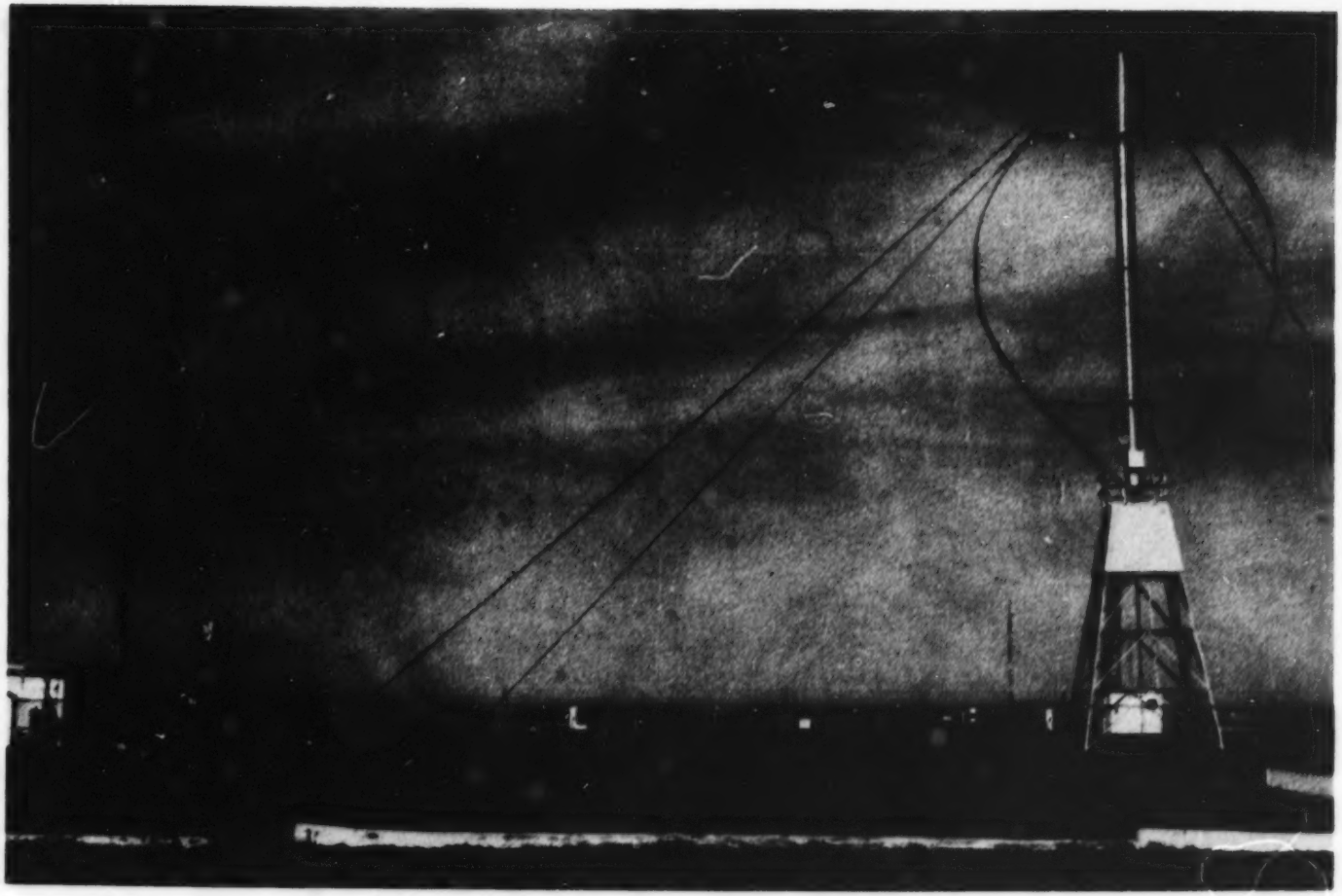


Fig. 17. EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, à Swift Current, (Saskatchewan)

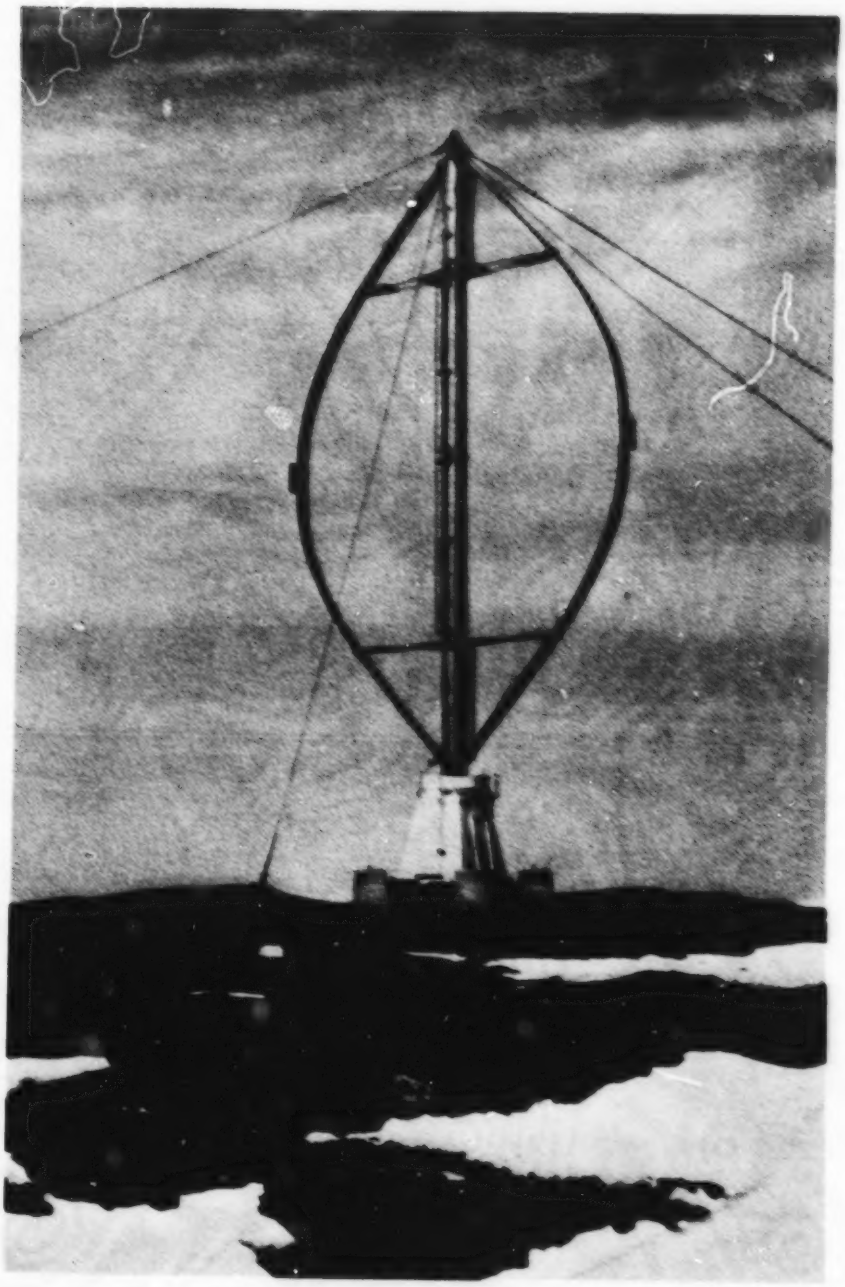


Fig. 18. EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Churchill (Manitoba)

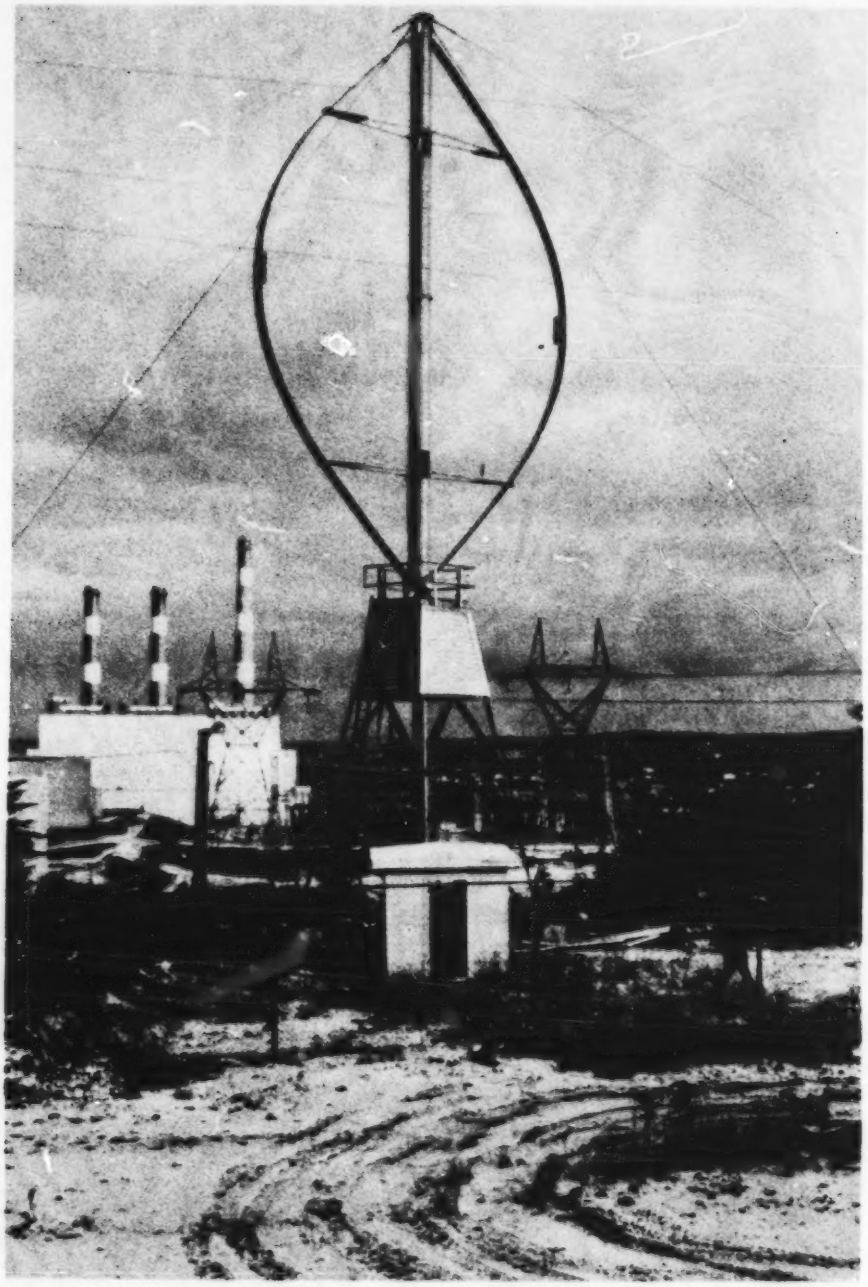


Fig. 19. EAV expérimentale de 50 kW couplée au réseau, Holyrood, (Terre-Neuve)

31 décembre 1984 *
date

ENDROIT	PARTE	MISE EN EXPLOITATION	DURÉE DE FONCTIONNEMENT (h)		PRODUCTION NETTE (MWh)	ÉTAT ACTUEL
			TOTAL	PRODUCTIF		
Holyrood (T.-N.) (I)	NL Hydro	Juin 1978	4 582	3 015	21,6	Démontée aux fins d'etude en nov. 1981
Holyrood (T.-N.) (II)	NL Hydro	Mai 1982	8 090	6 490	73,0	En service
Swift Current (Sask.)	Sask. Power	Août 1980	6 260	6 190	54,0	En service
Christopher Pt (C.-B.)	BC Hydro	Mars 1981	9 460	7 550	122,0	En service
Churchill (Man.)	Churchill Research Centre	Novembre 1981	10 570	8 790	116,0	En service
		TOTAUX	38 962	32 035	386,6	

* Chiffres approximatifs à la fin de l'exercice de 1984 (31 oct. 1984)

Fig. 20. Programme de recherche et développement du CNRC en matière d'énergie éolienne - EAV expérimentales de 50 kW

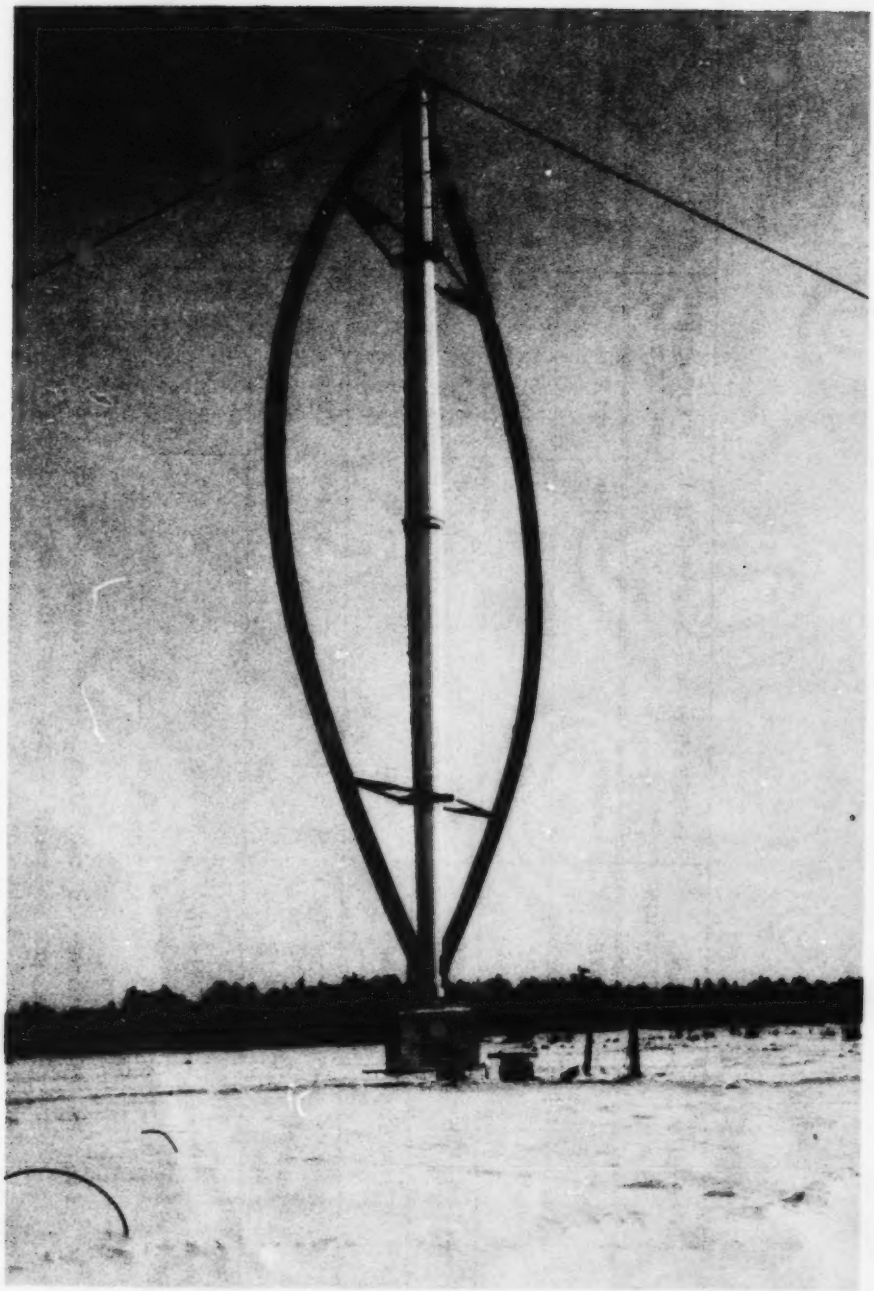


Fig. 21. Prototype d'EAV de 500 kW, Centre d'essais éoliens de l'Atlantique

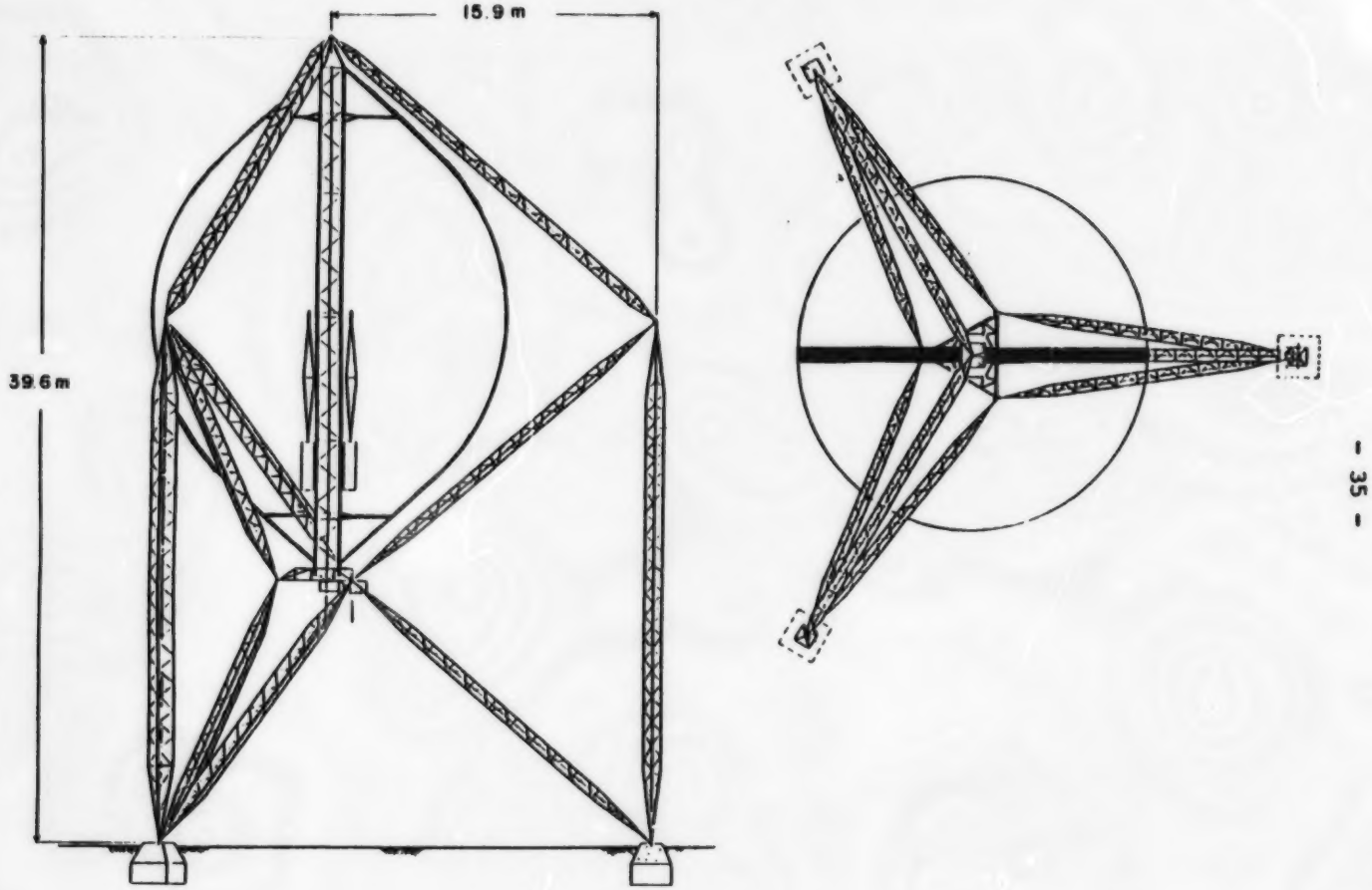


Fig. 22. EAV expérimentale de 125 kW à support rigide tripode

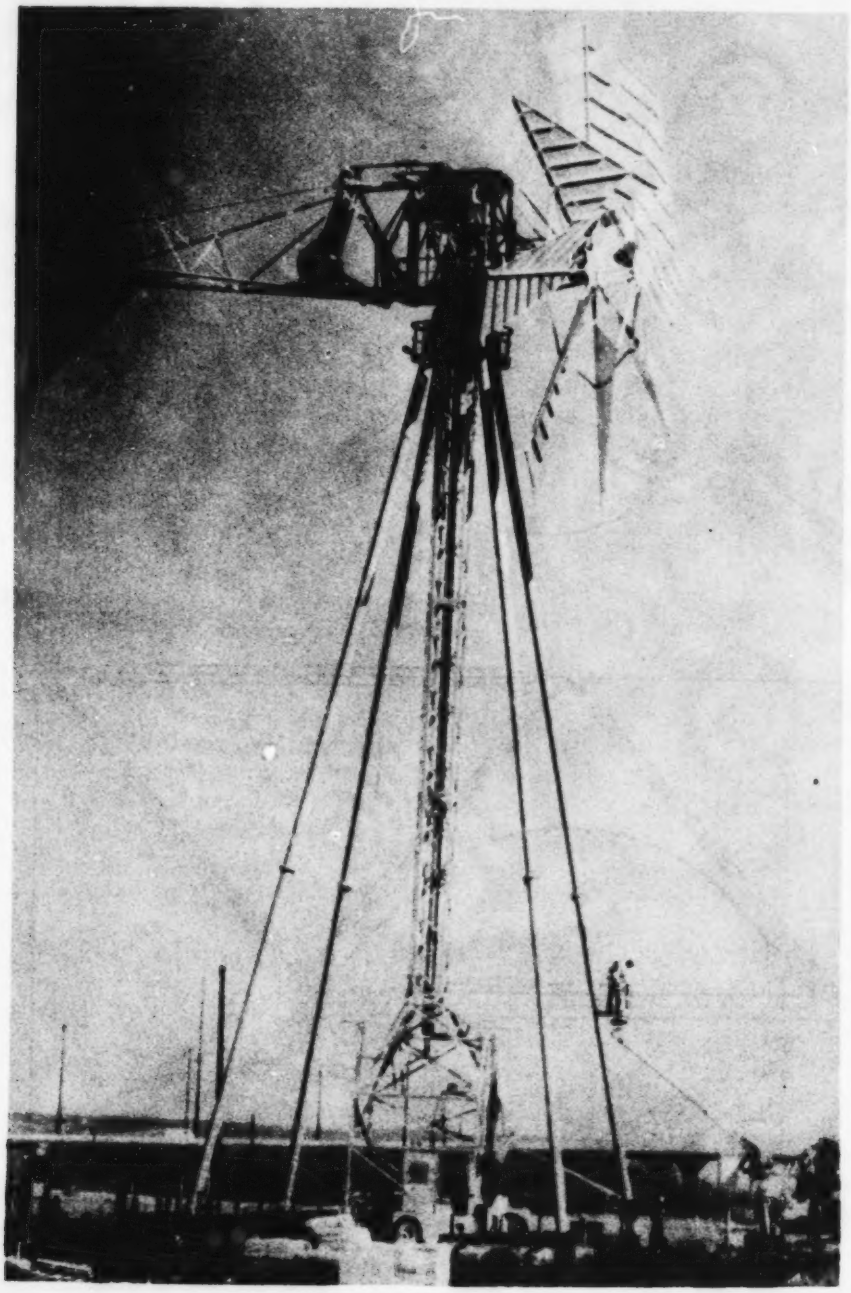


Fig. 23. Aéropompe d'irrigation DELTX d'une capacité de 100 m^3/min

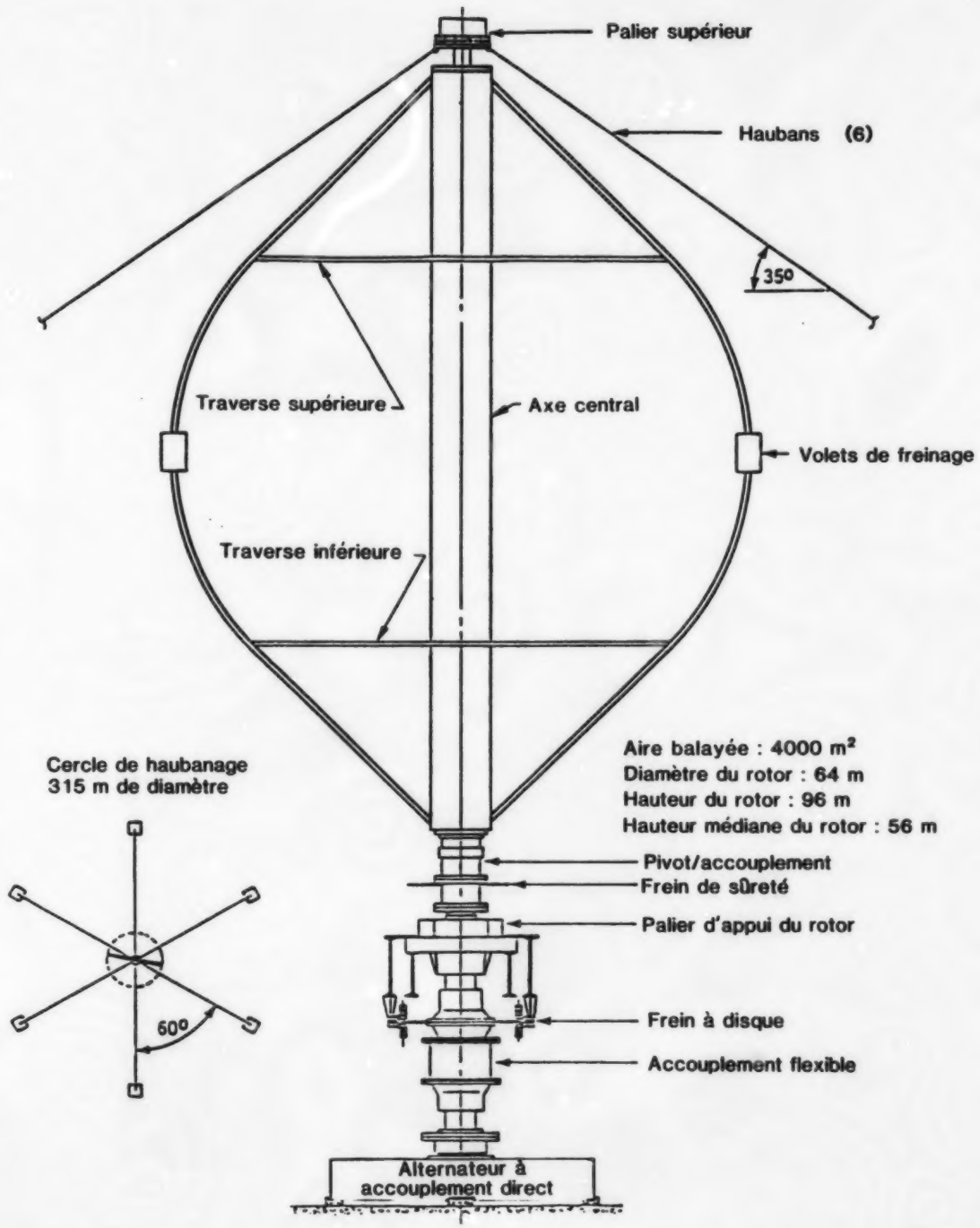


Fig. 24. ÉOLE - Pièces constitutives d'une EAV de 4 MW

Fig. 25. ÉOLE - Structure de supportage en voie de construction